Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 729-744

Calibration and Verification of the AquaCrop Model in Simulating the Yield, Dry Matter and Water Productivity of Grain Corn (*Zea mays* L.) under Different Irrigation Methods and Nitrogen Fertilizer Levels

Zhaleh Zarei[1], Hassan Heidari[2*], Saeid Jalali-Honarmand[2] and Ali Bafkar[3]

1 and 2- Ph.D. Graduated and Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively
3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding author's Email: heidari1383@gmail.com)

Received: 11-11-2021
Revised: 02-10-2021
Accepted: 04-01-2022
Available Online: 22-01-2025

How to cite this article:
Zarei, Z., Heidari, H., Jalali-Honarmand, S., & Bafkar, A. (2025). Calibration and verification of the AquaCrop model in simulating the yield, dry matter and water productivity of grain corn (*Zea mays* L.) under different irrigation methods and nitrogen fertilizer levels. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 729-744. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

Introduction

The decrease in rainfall in recent decades and the occurrence of drought in Iran, which is one of the arid and semi-arid regions, as well as the significant wastage of water in the agricultural sector, have caused many researchers to look for new irrigation methods that lead to improving water consumption. Therefore, the importance of conducting this experiment is to reduce surface water evaporation, save water, and reduce leaching and use of nitrogen fertilizer in maize cultivation. Nowadays, due to the decrease in rainfall and the excessive water consumption in the agricultural sector, the importance of water resources management has received more attention from researchers. Therefore, simulation models an effective role in evaluating irrigation management methods to improve water consumption in the agricultural sector. This study aimed to assess the AquaCrop model in terms of simulating the yield and biomass of maize under two methods of irrigation (wick and surface) and nitrogen fertilization (topdressing and fertigation).

Materials and Methods

This experiment was carried out in 2020 and 2021 in the Faculty of Agriculture of Razi University. Experimental treatments included wick irrigation and surface irrigation (at three levels of 100, 70, and 50%) and two levels of nitrogen fertilizer, 100 and 50% of the plant's fertilizer requirement. The statistical design was factorial in the form of randomized complete blocks and was implemented in three replications. In the wick irrigation method, fertilizer was provided to the plant through tanks and in solution. In the surface irrigation method, fertilizer was topdressing on the soil surface. Nitrogen fertilizer was applied in three stages. In each watering, the amount of water used will be measured and recorded through the meter. At the end of the experiment, the data measured in the first and second years were used for calibration and validation, respectively. For both stages of calibration and validation of the model, the measured (observed) and simulated values of yield, biomass, canopy cover, and water productivity were compared and statistically analyzed. For

https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

statistical evaluation, root mean square error (RMSE), efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe model (EF), and Wilmot agreement index (d) were used.

Results and Discussion

The results indicated that the root mean square error (RMSE) for simulating canopy cover development under various irrigation and fertilizer treatments ranged from 1.5% to 6.1% during the calibration stage (2020) and from 2% to 6.4% during the verification stage (2021). The model's efficiency factor (EF) for canopy cover simulation was between 0.91 and 0.99 during the calibration stage and between 0.93 and 0.99 during the validation stage. For biomass simulation, the RMSE values ranged from 1.07 to 2.1 tons/ha in the calibration stage and from 1.4 to 2.9 tons/ha in the validation stage. The model's EF for biomass simulation ranged from 0.87 to 0.98 in the calibration stage and from 0.92 to 0.99 in the validation stage. These results demonstrate the model's high accuracy and reliability in simulating both canopy cover and biomass development across different treatments. AquaCrop simulation results showed that the model was able to simulate water productivity better than yield and total biomass, so the coefficient of determination (R^2) related to water productivity, yield, and biomass of maize was obtained as 0.82, 0.52, and 0.54, respectively.

Conclusion

The simulation of yield, dry matter, and water productivity in the calibration and verification stage was lower than the actual value in all treatments. The most significant difference between the observed and simulated values of yield, biomass and water productivity was observed in the wick treatment (first and second year). According to the obtained results, it can be concluded that AquaCrop was chosen well and within the expectations for the studied area and the ability of AquaCrop in the field to provide a low irrigation model like the wick method is suitable and practical.

Keywords: Calibration, Irrigation management, Modeling, Urea fertilizer, Verification

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ۷٤٤-۷۲۹

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی میزان عملکرد، ماده خشک و بهره-وری آب ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) تحت روش‌های مختلف آبیاری و سطوح کود نیتروژنه

ژاله زارعی[۱]، حسن حیدری[۲]*، سعید جلالی هنرمند[۲] و علی بافکار[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

چکیده

هدف از این مطالعه، ارزیابی مدل AquaCrop از نظر شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت دانه‌ای تحت دو روش آبیاری (فتیله‌ای و سطحی) و کوددهی نیتروژن (کود سرک و کودآبیاری) بود. این آزمایش در دو سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری فتیله‌ای و آبیاری سطحی (در سه سطح ۱۰۰،۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و دو سطح کود نیتروژنه ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز کودی گیاه بود. نتایج نشان داد که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی در تیمارهای مختلف آبیاری و کودی در مرحله واسنجی (۱۳۹۹) بین ۱/۵ تا ۶/۱ درصد و در مرحله صحت‌سنجی (۱۴۰۰) بین ۲ و ۶/۴ درصد به‌دست آمد. مقدار ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، در مرحله واسنجی بین ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۳ و ۰/۹۹ بود. مقدار RMSE در شبیه‌سازی ماده خشک برای مرحله واسنجی بین ۱/۰۷ تا ۲/۱ تن در هکتار و در مرحله صحت‌سنجی بین ۱/۴ تا ۲/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل توانست شبیه‌سازی بهره‌وری آب را بهتر از عملکرد دانه و ماده خشک کل انجام دهد، به‌طوری‌که ضریب تبیین (R^2) مربوط به بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۸۲، ۰/۵۲ و ۰/۵۴ به‌دست آمد. در مجموع، AquaCrop به‌خوبی برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و توانایی AquaCrop در زمینه ارائه یک مدل کم‌آبیاری مانند روش فتیله‌ای مناسب است.

واژه‌های کلیدی: صحت‌سنجی، کالیبره، کود اوره، مدل‌سازی، مدیریت آبیاری

مقدمه

همه مناطق زراعی و به‌ویژه مناطق تحت آبیاری سنتی، نیاز به مدیریت مناسب منابع آب طبیعی (آب باران، آب‌های زیر زمینی و آب‌های سطحی) دارند که در آن، ابزارهای مفید و استراتژی‌های مدیریتی در پرداختن به چالش‌های فعلی برای برآوردن تقاضای فزاینده جهانی برای غذا، کلیدی هستند (López-Urrea et al., 2020). همچنین، سطوح بالای تنش آبی و افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها که عمدتاً ناشی از پویایی تغییرات اقلیمی است، باعث کاهش ذخیره منابع آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران شده است (Nazari et al., 2018). یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای کاهش مصرف آب در کشاورزی، تأمین مقدار دقیق آب آبیاری محصولات در مواقع مورد نیاز است تا بهره‌وری مصرف آب به حداکثر برسد (Rezaverdinejad et al., 2014). علاوه‌بر آب، نیتروژن نیز به‌عنوان اصلی‌ترین ماده مغذی مؤثر بر کیفیت و کمیت محصول در

۱ و ۲-به‌ترتیب فارغ‌التحصیل دکتری و دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: heidari1383@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

نظر گرفته می‌شود. بااین‌حال، مدیریت مناسب کود مستلزم آگـاهی از تقاضای نیتروژن محصول در طول دوره رشد برای اطمینان از حداکثر تولیـد اسـت (Rahimikhoob et al., 2021). آب عامـل اصـلی محدودکننده کارآیی کودهای نیتروژن در شرایط محـدود آب اسـت و تأمین آب کافی می‌تواند جذب آب و عناصر غـذایی را افـزایش دهـد (Cui et al., 2023). پیچیـدگی پاسخ‌های محصـول بـه کمبـود آب منجر به استفاده از توابع تولید تجربی به‌عنـوان کـاربردی‌ترین گزینـه برای ارزیابی عملکرد محصول در ارتباط با آب شده اسـت (Steduto et al., 2009). فائو رابطه بین عملکرد محصول و استفاده از آب را در اواخر دهه هفتاد مورد بررسـی قـرار داد و یـک معادلـه سـاده توسط دورنبوس و کسام[1] (۱۹۷۹) ارائه داد که در آن کاهش عملکـرد نسـبی به کـاهش نسـبی تبخیـر و تعـرق مربـوط اسـت (Steduto et al., 2012).

معادله (۱)
$$\left(1-\frac{Y}{Y_X}\right)=K_y\left(1-\frac{ET}{ET_X}\right)$$

که در آن، Y_X: حداکثر عملکرد، Y: عملکرد واقعی، ET_X: حداکثر تبخیر- تعرق، ET: تبخیر- تعرق واقعی و K_y: فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر- تعرق است.

ازاین‌رو برای کاهش تلفات آب و شست‌وشوی نیتروژن، به مدل-های شبیه‌سازی محصول مورد نیاز است که بتواند داده‌های مزرعه‌ای موجود، یعنی دما، باران/آبیاری، بافت خاک و عملکرد خشک را ترکیب کنـد (Dercas et al., 2022). مـدل‌های شبیه‌سـازی محصـول، ابزارهای ارزشمندی برای کمّی کردن واکنش عملکرد محصول به آب و ابداع استراتژی‌هایی جهـت بهبـود مـدیریت آب کشـاورزی هسـتند (Foster et al., 2017)، ازاین‌رو برای پرداختن بـه امنیـت غـذایی و ارزیابی تولید محصول تحت تأثیر محیط و مدیریت، تعداد زیادی مدل شبیه‌سازی محصول توسعه داده شده است. این مدل‌ها اغلب به تعداد زیادی متغیر ورودی و مقادیر پارامتر نیاز دارند که به‌راحتی برای طیف متنوعی از محصولات و محیط‌ها در سراسر جهان در دسترس نیستند (Vanuytrecht et al., 2014). در میـان ایـن مـدل‌ها، AquaCrop یک نوع مدل حرفه‌ای است که تعادل بهینه را بین دقت، اسـتحکام و سادگی حـفظ می‌کنـد و بـه تعـداد نسـبتاً کمـی پـارامتر نیـاز دارد (Abedinpour et al., 2021; Steduto et al., 2009). در مقایسه با مدل‌های دیگر، مدل AquaCrop یک مدل مبتنی بـر آب اسـت کـه اثرات کمبود آب خاک را بر فرآیندهای رشد مختلف، بـه‌عنوان مثـال، گسترش تاج‌پوشش، پیری تاج‌پوشـش، هـدایت روزنـه‌ای، و شـاخص برداشت به حساب می‌آورد (Zhang et al., 2022). اگرچه این مـدل اغلب برای شبیه‌سـازی محصـولات مختلـف و تعـادل آب در مزرعـه تحت تیمارهای مختلف آبیاری استفاده شده است، امّـا مطالعـاتی کـه AquaCrop را به کوددهی مرتبط می‌کنـد، نـادر اسـت (Dercas et al., 2022). امّا یک چیز وجود دارد که باید از آن آگاه بود ایـن اسـت که مدل AquaCrop در روش نیمه کمی بـرای ارزیـابی تـنش کـود استفاده می‌شود. یعنی نمی‌تواند مستقیماً پاسخ محصول به کـود را در پرتو تقاضای کود گیاهی و محتوای تغذیه خاک شبیه‌سازی کنـد. بـه طور خلاصه، تنش کود در این مدل ممکن اسـت تجربـی و نادرسـت باشد (Wu et al., 2022).

در یک آزمایش، سطوح مختلف آبیاری (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) و نیتروژن (۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلـوگرم در هکتـار) بـرای گیـاه ذرت دانه‌ای کالیبره و اعتبارسنجی شد. پس از اعتبارسـنجی، خطـای پیش‌بینـی بـین ۶ و ۱۰، ضـریب تبیـین بـین ۰/۶۵ و ۰/۷۶ و ریشـه میانگین مربع خطای نرمال شده بـین ۱۰۶۲ و ۱۲۹۳ بـه‌ترتیب بـرای عملکرد دانه و زیست‌توده بود. بر این اساس، نتایج آزمایش نشـان داد که مدل AquaCrop زیست‌توده بـالای زمـین را بـا دقـت بیشـتری نسبت به عملکرد دانه شبیه‌سازی می‌کند (Abedinpour, 2016). در بررسی دیگر، مدل AquaCrop از نظـر توانـایی آن در شـبیه‌سـازی عملکرد چغندرقند در شرایط آب کامل و کم‌آبی و دو سـطح نیتـروژن در یک محیط خشک در مرکز ایران مورد ارزیابی قرار گرفـت. نتـایج این آزمایش نشان داد که مدل AquaCrop قادر به شبیه‌سازی دقیق زیست‌توده محصول، عملکرد ریشه و تاج‌پوشش، بـا میـانگین خطـای مربع ریشه نرمال شـده (RMSE) کمتـر از ۱۸ درصـد بـرای شـرایط بدون تنش آبی یا تنش خفیف آبی بود. بیشـترین انحـراف در شـبیه-سازی عملکرد ریشه در تیمار تنش آبی بالا و سـطح نیتـروژن پـایین بود. تاج‌پوشش تقریباً در تمام تیمارها به اندازه کافی خوب شبیه‌سازی شد، امّا روند مشابهی با عملکرد ریشه مشاهده شد (Alishiri et al., 2014). نتایج یک آزمایش مزرعه‌ای بـا سـه سـطح آبیـاری غرقـابی (آبیاری مداوم و با فواصل پنج و هشت روز) و سه سطح نیتروژن (۴۵، ۶۰ و ۷۵ کیلوگرم در هکتار) روی برنج نشـان داد کـه آزمـون آمـاری مدل برای زیست‌توده کل و خوشه، مقادیر ضریب تبیـین (R^2) نسـبتاً بالا (۰/۹۰ ≤) و مقادیر میانگین مجذور خطاهای ریشه مطلق و نرمال

1- Doorenbos and Kassam

شده (RMSEn) متوسط (۶-۳۶ درصد) را نشان داد، که تأیید می‌کند که مدل زیست‌توده کل و خوشه را به‌دقت شبیه‌سازی کرده است (Amiri, 2016). در یک آزمایش، پنج سطح نیتروژن (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از نیتروژن توصیه شده) و دو رقم سویا در شرایط دیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تاج‌پوشش، ذخیره آب خاک، تبخیر و تعرق و عملکرد دانه سویای دیم با سطوح مختلف کود نیتروژن تحت توزیع زمانی بارش فصلی مناسب است. بنابراین، می‌تواند به‌عنوان ابزار مفیدی برای کشاورزان خرده‌مالک در پیش‌بینی بهره‌وری دانه سویا و بهینه‌سازی تخصیص منابع، استفاده از زمین و آب در سیستم‌های کشاورزی گرمسیری باشد (Adeboye et al., 2021). هدف تحقیق حاضر، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای برآورد میزان عملکرد، ماده خشک و بهره‌وری آب ذرت تحت روش‌های مختلف آبیاری و سطوح کود نیتروژنه بود.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش و تیمارها

آزمایشی جهت ارزیابی تأثیر آب و نیتروژن بر رشد ذرت دانه‌ای (رقم سینگل کراس ۷۰۴) در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی رازی کرمانشاه انجام شد. محل آزمایشی در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا واقع شده است. آزمایش به‌صورت مزرعه‌ای و در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ انجام شد. در این آزمایش، تیمارها شامل دو روش آبیاری فتیله‌ای و آبیاری سطحی با دو روش کوددهی نیتروژن بود. پژوهش به‌صورت طرح فاکتوریل با بلوک‌های کامل تصادفی و سه تکرار بود. آبیاری سطحی در سه سطح ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد براساس نیاز آبی ذرت و کود نیتروژن به‌صورت کود اوره و در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه بود. قبل از اجرای طرح، از خاک مزرعه نمونه‌برداری انجام شد. سپس، براساس مقدار ماده آلی خاک و نیاز غذایی ذرت، میزان کود در سطح ۱۰۰ درصد تعیین شد و سطح ۵۰ درصد نیز از این مقدار محاسبه شد. فاصله بین بلوک‌ها ۱/۵ متر و فاصله بین هر پلات دو متر بود. در هر پلات پنج خط کاشت که فاصله بین ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود، در نظر گرفته شد. در اوایل اردیبهشت، بذرهای ذرت در مزرعه کاشته شدند. پس از استقرار کامل گیاه، عملیات تنک کردن و وجین به‌صورت دستی صورت گرفت. نیاز آبی در آبیاری سطحی با استفاده از برنامه CROPWAT و از روش فائو- پنمن- مانتیث محاسبه گردید. این روش، تبخیر و تعرق گیاه را با توجه به معادله پیشنهادی فائو ۵۶ تعیین می‌کند که به شرح زیر است:

$$ETc = ETo \times Kc \quad (۲)$$

که در آن، ETc: تبخیر و تعرق گیاه، ETo: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر در روز و Kc: ضریب گیاهی پایه است. مقادیر ضریب گیاهی در این نرم‌افزار برای دوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی رشد به‌ترتیب ۰/۱۵، ۰/۶۵، ۱/۱۵ و ۰/۳۵ ارائه شده است.

در آبیاری سطحی، کود اوره در سه مرحله ۳۰ ، ۴۵ و۷۰ روز پس از سبز شدن گیاه ذرت و به‌صورت سرک اعمال شد. امّا در آبیاری فتیله‌ای، کود به‌صورت محلول در آب مورد استفاده قرار گرفت. جهت طراحی آبیاری فتیله‌ای از وسایل ساده و ارزان استفاده شد که شامل نخ به‌عنوان فتیله که از خرازی‌ها تهیه گردید. بشکه به‌عنوان مخزن آب و شلنگ آبیاری قطره‌ای جهت انتقال آب از مخزن به ناحیه ریشه استفاده شد. به کمک رابط هر قطعه شلنگ در محل فتیله‌ها به هم متصل شدند. دور آبیاری در آبیاری سطحی، هفته‌ای یک‌بار و در آبیاری فتیله‌ای، مخزن‌ها دو روز یک‌بار پر می‌شدند. نمایی از مزرعه و اعمال آبیاری فتیله‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.

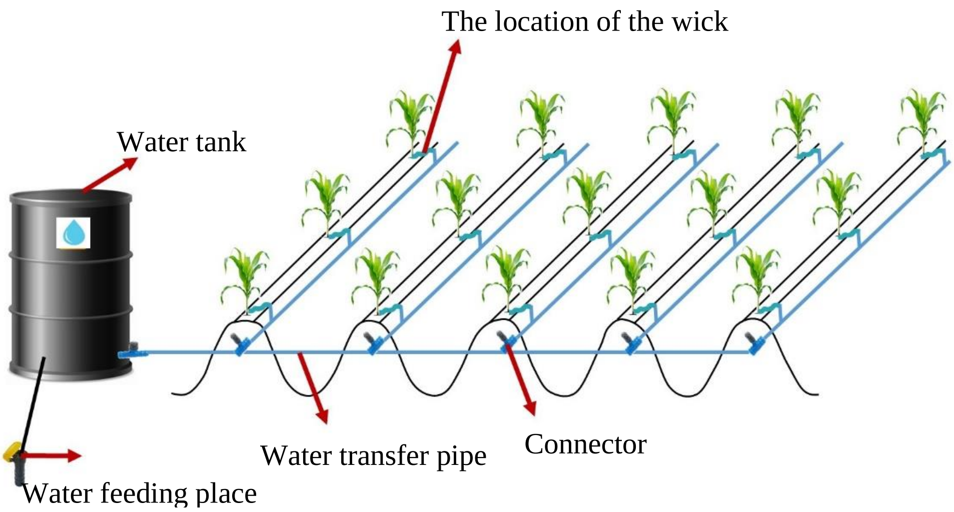
مدل AquaCrop

اگرچه AquaCrop مبتنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی اولیه و پیچیده است، امّا از تعداد نسبتاً کمی از مشخصه‌های صریح و متغیرهای ورودی تا حد زیادی بصری استفاده می‌کند، که یا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند یا به روش‌های ساده‌ای برای تعیین آن‌ها نیاز دارند (Raes et al., 2009). پارامترهای مورد استفاده در این مدل شامل:

مشخصه‌های گیاهی

یکی از اهداف واسنجی، تعیین برخی از مشخصه‌های گیاهی مدل می‌باشد که امکان اندازه‌گیری آن وجود ندارد. بنابراین، باید با دقت فایل مورد نظر تهیه و داده‌ها اندازه‌گیری گردد. با استفاده از فایل گیاهی پیش‌فرض مدل، پارامترهای اندازه‌گیری انجام شده در طول دوره کشت محصول از جمله تاریخ جوانه‌زنی، حداکثر پوشش گیاهی، تاریخ گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی و ... وارد مدل شده و فایل مورد

نظر جهت واسنجی آماده گردید.



شکل ۱- نمای از آبیاری فتیله‌ای در مزرعه
Fig. 1- View of wick irrigation in the field

جهت محاسبه پوشش تاج‌پوشش، یک مترمربع از هر کرت انتخاب و چهار شاخص در چهار طرف زمین قرار داده شد. سپس به کمک عکس هوایی و انجام ایمیج پراسسینگ در نرم‌افزار جی‌آی‌اس هر ۱۰ روز یک‌بار میزان پوشش گیاهی ثبت شد.

داده‌های خاک

داده‌های مربوط به خاک عبارتند از: هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، محتوای آب حجمی در اشباع (SAT)، ظرفیت مزرعه (F_C) و نقطه پژمردگی دائمی (PWP). این داده‌ها از بافت خاک محل آزمایش محاسبه و به برنامه وارد شد (جدول ۱). برای این منظور از هر پلات، نمونه‌های خاک دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فولادی با قطر و ارتفاع پنج سانتی‌متر و نمونه دست‌خورده خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر برداشت شد. سپس، نمونه‌ها در هوای آزمایشگاه خشک و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله بافت خاک به‌روش هیدرومتری و مقدار رطوبت جرمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به‌ترتیب با اعمال ۰/۳۳ و ۱۵ بار انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات خاک محل آزمایش (عمق ۳۰-۰ سانتی متر)
Table 1- General properties of the soil of the experimental site (depth of 0–30 cm)

خصوصیات خاک Soil properties	2020	2021
شن Sand (%)	14.40	19.40
رس Clay (%)	44.00	37.20
سیلت Silt (%)	41.60	43.40
ظرفیت زراعی Field capacity (%)	40.90	39.40
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity ($mm.h^{-1}$)	5.00	16.14
نقطه اشباع Saturation (%)	50.0	58.2
نقطه پژمردگی Wilting point (%)	26.30	23.80

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش طی دور رشد ذرت در سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 2- Meteorological information of the experiment site during the maize growth period in 2020 and 2021

سال Year	ماه Month	دما Tempecure (°C)			رطوبت Humidity (%)			بارندگی Precipitation (mm)
		حداکثر Max	متوسط Avg.	حداقل Min	حداکثر Max	متوسط Avg.	حداقل Min	
2020	اردیبهشت May	33.5	17.7	3.7	75	47	20	40.1
	خرداد June	37.6	25.1	9.8	39	22	4	0
	تیر July	42.7	21.7	13.1	31	18	6	0
	مرداد August	42.2	29.6	14.3	31	18	4	0
	شهریور September	37.8	19.0	11.5	29	16	4	0
2020	اردیبهشت May	36.3	21.3	5.5	50	30	9	8.0
	خرداد June	42.3	25.9	9.8	31	17	3	0
	تیر July	41.3	30.4	15.3	22	13	3	0
	مرداد August	42.6	29.5	15.8	28	16	5	0
	شهریور September	39.7	26.5	10.4	25	14	3	0

داده‌های اقلیمی

داده‌های آب‌وهوایی در مدل AquaCrop عبارتند از: بیشینه و کمینه دمای روزانه (T) برحسب درجه‌سانتی‌گراد، بارندگی (R)، تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_O) و متوسط غلظت سالیانه دی‌اکسیدکربن CO_2. آمار مربوط به داده‌های آب‌وهوایی از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی واقع در محل مطالعه جمع‌آوری شد (جدول ۲). در نهایت، برای غلظت دی‌اکسید کربن از اطلاعات موجود در رصدخانه Manaloa در هاوایی استفاده شد.

ارزیابی مدل

در نهایت، برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مقادیر اندازه‌گیری (واقعی) و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، ماده خشک، پوشش گیاهی و بهره‌وری آب مقایسه و تحلیل آماری گردید. برای ارزیابی آماری، از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[1])، ضریب کارآیی مدل نش- ساتکلیف[2] (EF[3]) و شاخص توافق ویلموت[4] (d) استفاده شد (Willmott, 1982). RMSE، ریشه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد که هرچه میانگین مربعات اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کمتر باشد، این شاخص به صفر نزدیک‌تر و هرچه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده اختلاف بیشتری باشد، این شاخص از صفر بزرگ‌تر می‌باشد و به‌سمت مقادیر بزرگ میل می‌کند:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{n}} \qquad \text{معادله (۳)}$$

ضریب کارآیی مدل نش-ساتکلیف (EF) اندازه نسبی واریانس شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس مشاهدات تعیین می‌کند و نشان می‌دهد که داده‌های مشاهده‌شده در مقابل شبیه‌سازی‌شده چه میزان با خط ۱:۱ مطابقت دارند. محدوده EF از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است که در آن عدد ۱ تطابق کامل بین مقادیر شبیه‌سازی شده

1- Root Mean Square Error
2- Nash-Sutcliffe
3- Model Efficiency
4- Index of Agreement

و مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقادیر EF و d با معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad \text{(۴) معادله}$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i-\bar{O}|+|O_i-\bar{O}|)^2} \quad \text{(۵) معادله}$$

مقدار d از صفر تا یک متغیر است و با نزدیک شدن d به یک، عملکرد مدل بهبود می‌یابد. EF برای تبیین کمیت قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد، در حالی‌که RMSE نشان‌دهنده خطا در پیش‌بینی مدل است. در معادله‌های بالا، O_i و S_i: به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) و شبیه‌سازی شده است. $\bar{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده هستند و n: تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

پوشش گیاهی[1] (CC)

پارامترهای آماری ارزیابی مدل AquaCrop برای هر یک از تیمارها در جدول ۳ ارائه شده است. براساس این نتایج، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی در تیمارهای مختلف آبیاری و کودی در مرحله واسنجی (۱۳۹۹) بین ۱/۵ تا ۶/۱ درصد و در مرحله صحت‌سنجی (۱۴۰۰) بین ۲ و ۶/۴ درصد به‌دست آمد. همچنین مقدار شاخص توافق ویلموت (d) در این شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف در مرحله واسنجی بین ۰/۹۷ و ۱، و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۸ و ۱ به‌دست آمد. مقدار ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، در مرحله واسنجی بین ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۳ و ۰/۹۹ بود (جدول ۳). براساس نتایج به‌دست آمده، AquaCrop به‌خوبی می‌تواند روند توسعه CC را تحت تمام تیمارها همان‌طور که در مقادیر d و EF بالا و RMSE پایین (کمتر از ۱۰ درصد) نشان داده شده است، ثبت کند. علاوه‌براین، دقت شبیه‌سازی تیمار سطحی۱۰۰-کود۵۰ (سال اول) و سطحی۵۰-کود۵۰ (سال دوم) بهتر از سایر تیمارها بود. امّا در هر دو سال، دقت شبیه‌سازی بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان نداد. در پژوهش‌های مشابه، گزارش شده است که d بالا و RMSE پایین برای همه تیمارها نشان می‌دهد که این مدل در شبیه‌سازی توسعه تاج‌پوشش در محیط‌های مختلف آبی قوی است (Greaves & Wang, 2016).

مقایسه روند توسعه پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و واقعی در تیمارهای مختلف آبیاری و کود طی مراحل واسنجی (۱۳۹۹) و صحت‌سنجی (۱۴۰۰) در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، در تمام تیمارها، ابتدا پوشش گیاهی روندی افزایشی داشته و به بیشترین مقدار خود رسید و پس از آن، تا چند روز تقریباً ثابت ماند و سپس، تا انتهای فصل رشد روندی کاهشی داشت. سطح زیر منحنی-ها، مبین درصد پوشش سبز است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، اعمال تنش کودی (۵۰ درصد) به علت کاهش رشد و تولید برگ‌ها و افزایش پیری آن‌ها، باعث کاهش روند توسعه پوشش گیاهی شده است که نتایج شبیه‌سازی با مدل AquaCrop نیز نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی توسط مدل نیز تحت تنش کودی کاهش یافته است. در مطالعات مشابهی بیان شده است که مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل رضایت‌بخش بود، زیرا مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده پوشش گیاهی به‌خوبی مطابقت داشتند (Pawar et al., 2017). در بررسی دیگر بیان شده است که یک همبستگی قوی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده واسنجی و اعتبارسنجی وجود داشت (Shirazi et al., 2021).

ماده خشک

مقایسه رشد ماده خشک واقعی و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف آبیاری و کود نیتروژن، طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، در شکل ۳ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، در تمام تیمارها ابتدا ماده خشک رشد آهسته داشت، امّا با گذشت چند روز، تجمع ماده خشک با شیب بیشتری افزایش یافت و پس از آن، تجمع ماده خشک ثابت ماند. این واقعیت که تجمع ماده خشک شبیه‌سازی شده با تجمع ماده خشک اندازه‌گیری شده مطابقت دارد، از این رویکرد پشتیبانی می‌کند و الگوریتم مورد استفاده برای تجمع ماده خشک را تأیید می‌کند (Heng et al., 2009).

مقدار RMSE برای مرحله واسنجی بین ۱/۰۷ تا ۲/۱ تن در هکتار و در مرحله صحت‌سنجی بین ۱/۴ تا ۲/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d) در این شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

1- Crop cover

بین ۰/۹۶ و ۱ به‌دست آمد. ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی ماده خشک ذرت در مرحله واسنجی بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۸ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ بود (جدول ۳). براساس این نتایج، می‌توان بیان کرد که توسعه واقعی و شبیه‌سازی شده ماده خشک در تمام تیمارها با مقادیر d و EF بالا و مقادیر پایین RMSE مطابقت بالایی داشت. گزارش شده است که مدل AquaCrop باتوجه به مقادیر بالای d، R^2 و E بالا و RMSE پایین، قادر به شبیه‌سازی قابل قبولی از ماده خشک تحت تیمارهای آبیاری بهینه است (Abedinpour, 2021).

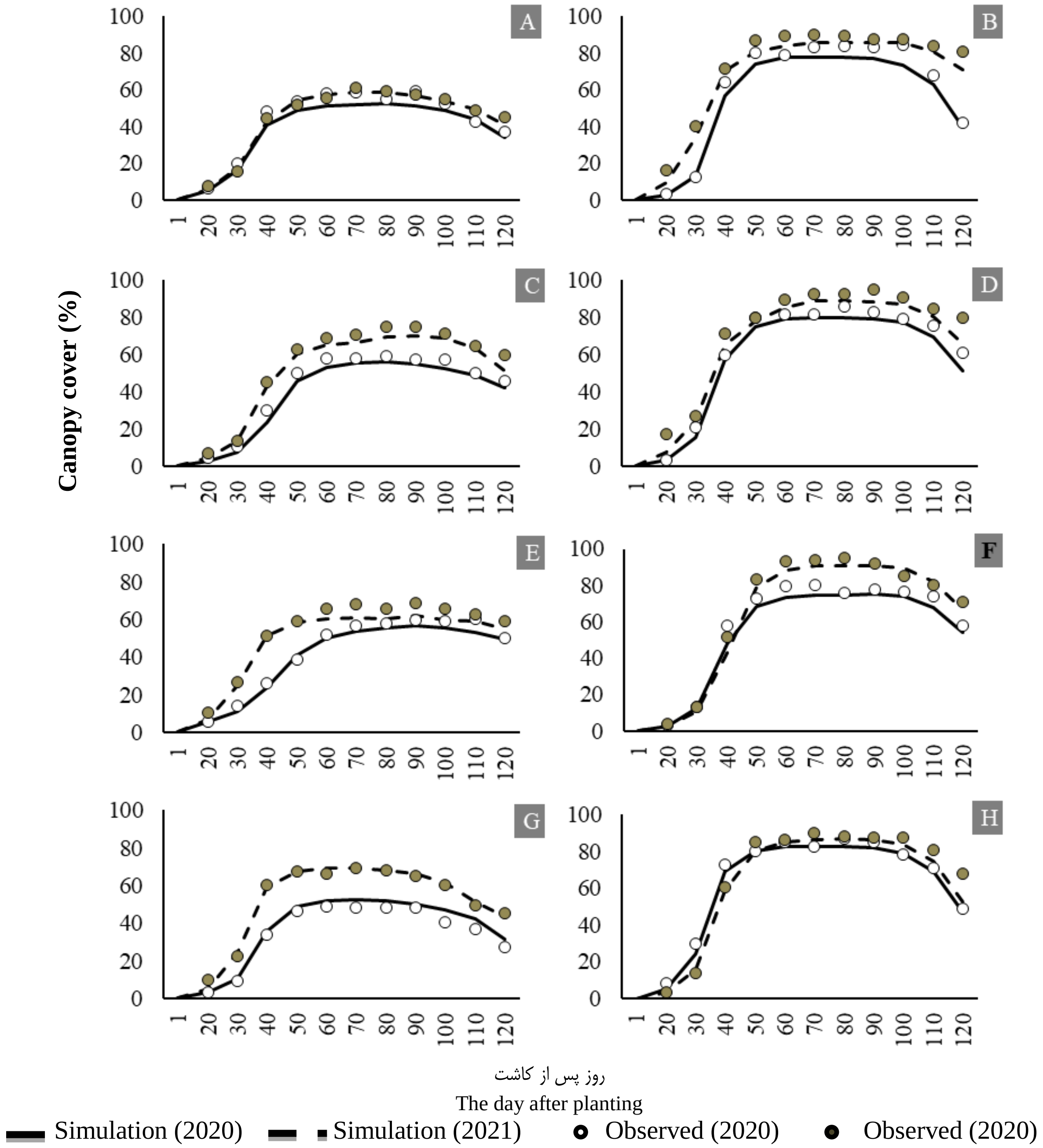
جدول ۳- شاخص‌های آماری پوشش گیاهی و ماده خشک شبیه‌سازی شده توسط AquaCrop تحت تیمارهای مختلف آبیاری و کود در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 3- Statistical indices of crop cover and dry matter simulated by AquaCrop under different irrigation and fertilizer treatments in 2020 and 2021

سال Year	تیمار Treatment	پوشش گیاه Cover crop			ماده خشک Biomass		
		RMSE[1] (%)	EF[2]	d[3]	RMSE (ton.ha^{-1})	EF	d
واسنجی (۱۳۹۹) Calibration (2020)	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	3.0	0.99	1.0	1.07	0.97	0.99
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	3.6	0.94	0.99	2.1	0.87	0.96
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{100}$	6.1	0.96	0.99	1.1	0.98	1.0
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{50}$	1.5	0.99	1.0	1.4	0.97	0.99
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{100}$	4.8	0.97	0.99	1.2	0.98	0.99
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{50}$	3.8	0.96	0.99	1.1	0.97	0.99
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{100}$	5.6	0.99	1.0	2.0	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{50}$	5.1	0.91	0.97	1.5	0.94	0.99
صحت‌سنجی (۱۴۰۰) Validated (2021)	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	5.6	0.96	0.99	2.2	0.97	0.99
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	2.1	0.97	0.99	2.9	0.92	0.98
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{100}$	4.2	0.98	1.1	1.4	0.99	1.0
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{50}$	4.7	0.93	0.98	2.0	0.97	0.99
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{100}$	6.4	0.94	0.99	2.0	0.96	0.99
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{50}$	4.1	0.97	0.99	2.3	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{100}$	5.2	0.95	0.99	2.2	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{50}$	2.0	0.99	1.0	2.1	0.93	0.98

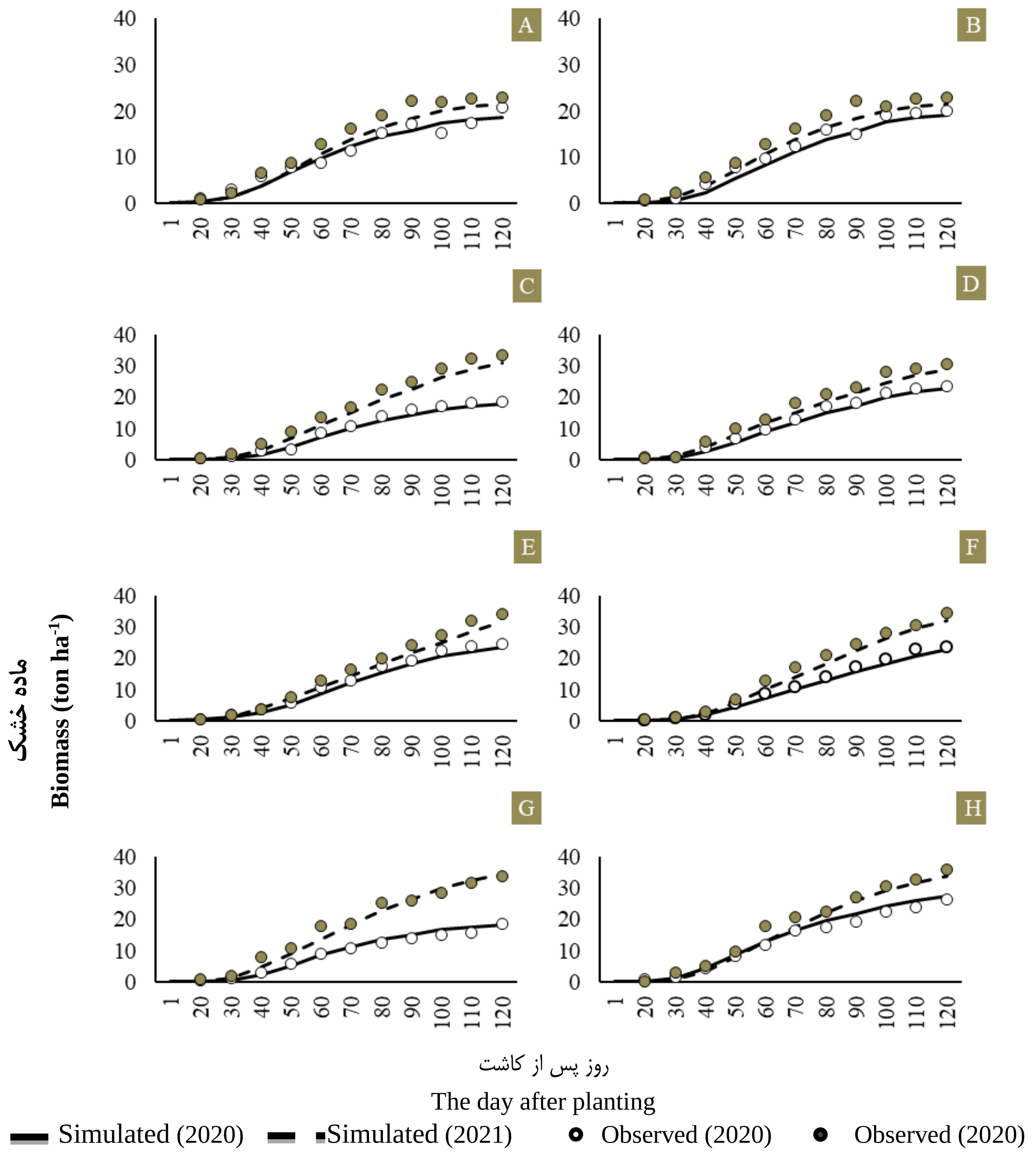
۱: ریشه میانگین مربعات خطا، ۲: کارایی مدل، ۳: شاخص توافق

1: Root Mean Square Error, 2: Model Efficiency, 3: Index of Agreement



شکل ۲- مقایسه رشد پوشش گیاهی واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای سطحی ۵۰-کود۵۰ (A)، سطحی ۵۰-کود۱۰۰ (B)، سطحی ۷۰-کود۵۰ (C)، سطحی ۷۰-کود۱۰۰ (D)، سطحی ۱۰۰-کود۵۰ (E)، سطحی ۱۰۰-کود۱۰۰ (F)، فتیله-کود ۵۰ (G)، فتیله-کود ۱۰۰ (H) طی دو فصل رشد (۱۳۹۹ و ۱۴۰۰)

Fig. 2- Comparison of observed and simulated canopy cover under the treatments of surface$_{50}$-fertilizer$_{50}$ (A), surface$_{50}$-fertilizer$_{100}$ (B), surface$_{70}$-fertilizer$_{50}$ (C), surface$_{70}$-fertilizer$_{100}$ (D), surface$_{100}$-fertilizer$_{50}$ (E), Surface$_{100}$-fertilizer$_{100}$ (F), wick-fertilizer$_{50}$ (G), wick-fertilizer$_{100}$ (H) during two growing seasons (2020 and 2021)



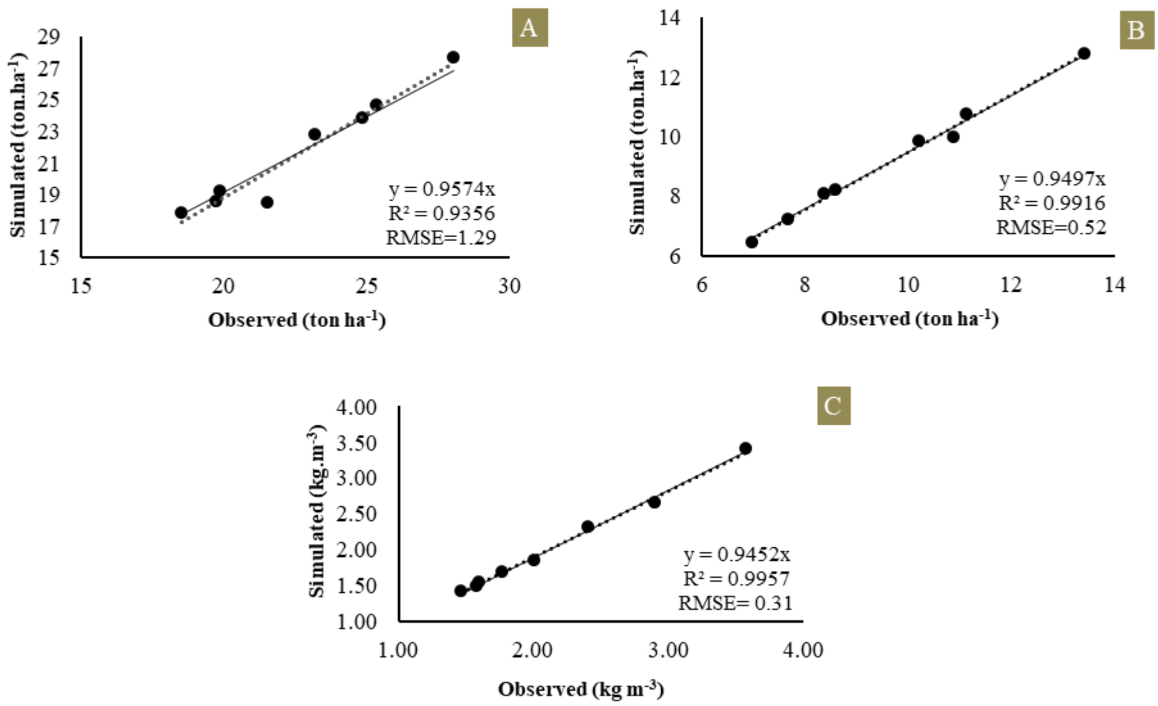
شکل ۳- مقایسه توسعه ماده خشک واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای سطحی۵۰-کود۵۰ (A)، سطحی۵۰-کود۱۰۰ (B)، سطحی۷۰-کود۵۰ (C)، سطحی۷۰-کود۱۰۰ (D)، سطحی۱۰۰-کود۵۰ (E)، سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ (F)، فتیله-کود ۵۰ (G)، فتیله-کود ۱۰۰ (H) طی دو فصل رشد (۱۳۹۹ و ۱٤۰۰)

Fig. 3- Comparison of observed and simulated biomass development under the treatments of surface$_{50}$-fertilizer$_{50}$ (A), surface$_{50}$-fertilizer$_{100}$ (B), surface$_{70}$-fertilizer$_{50}$ (C), surface$_{70}$-fertilizer$_{100}$ (D), surface$_{100}$-fertilizer$_{50}$ (E), Surface$_{100}$-fertilizer$_{100}$ (F), wick-fertilizer$_{50}$ (G), wick-fertilizer$_{100}$ (H) during two growing seasons (2020 and 2021)

عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب

مقایسه بین عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و واقعی توسط مدل AquaCrop طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی طی دو سال آزمایش در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. با

توجه به این شکل، AquaCrop توانسته است که بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل را به‌خوبی شبیه‌سازی کند، به‌طوری‌که ضریب تبیین (R^2) به‌منظور واسنجی مربوط به بهره-وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۳ به‌دست آمد (شکل ۴). در مرحله صحت‌سنجی، مقدار R^2 برای بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۹۷ و ۰/۹۶ بود (شکل ۵). گزارش شده است که مقادیر مناسب آمارها، برای مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی عملکرد استفاده شود (Abedinpour, 2021).



شکل ٤- رابطه بین ماده خشک کل (A)، عملکرد دانه (B) و بهره‌وری آب (C) واقعی و شبیه‌سازی شده به‌منظور واسنجی AquaCrop (سال ۱۳۹۹)

Fig. 4- Relationship between observed and simulated total biomass (A), seed yield (B) and water productivity (C) for AquaCrop calibration (2020 year)

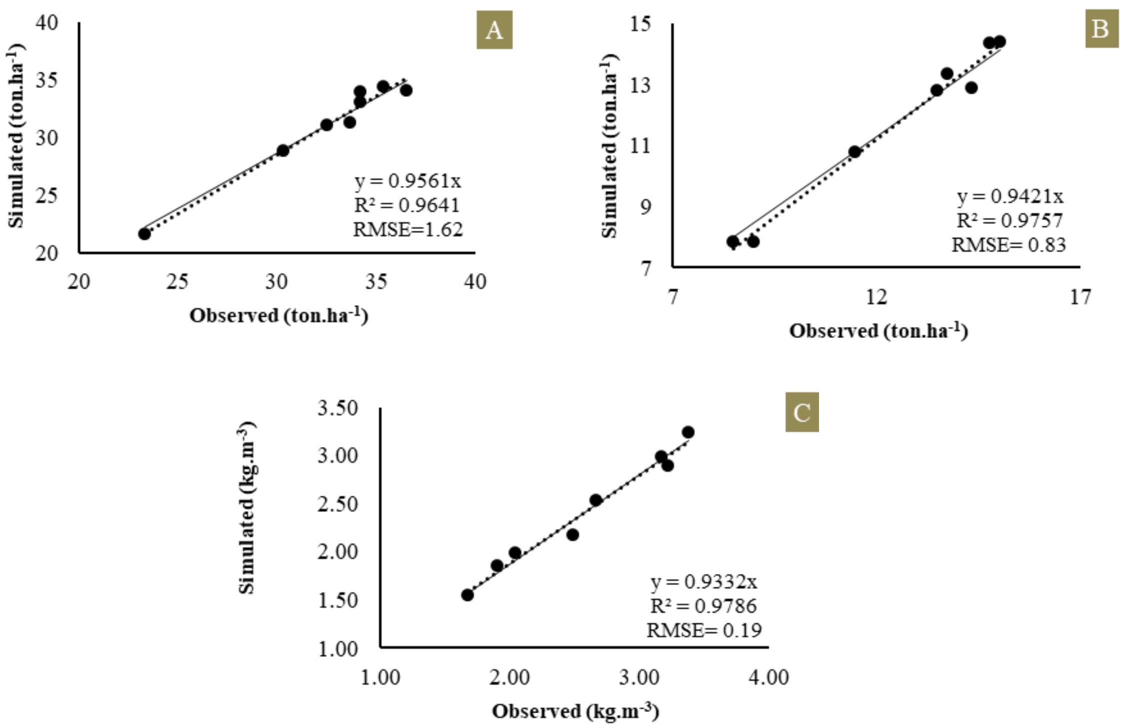
نتایج مشخصه‌های آماری مربوط به شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب با استفاده از مدل AquaCrop، در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار RMSE برای عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب به‌ترتیب برابر با ۰/۵۲، ۱/۲۹ و ۰/۳۱ در مرحله واسنجی و ۰/۸۳، ۱/۶۳ و ۰/۱۹ در مرحله صحت‌سنجی بود. با توجه به اینکه مقدار RMSE برای هر سه صفت پایین بود، این امر نشان می‌دهد که شبیه‌سازی به‌خوبی انجام گرفته است. در تحقیقات مشابه نشان داده شده است که مدل AquaCrop به‌وضوح قادر به شبیه‌سازی عملکرد دانه در محدوده قابل قبولی است (Umesh et al., 2022). همچنین بیان شده است که زیست‌توده کل شبیه‌سازی شده به‌شدت با داده‌های مشاهده شده همبستگی دارد (Amiri, 2016).

ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل AquaCrop بر عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب مربوط به تیمارهای آبیاری فتیله‌ای-کود۵۰ و آبیاری سطحی۵۰-کود ۵۰ بود. در تحقیقات مشابه گزارش شده است که بیشترین انحراف برای عملکرد دانه در مورد تیمار دیم شبیه‌سازی شد. آن‌ها این احتمال را دادند که رشد تاج‌پوشش تحت تنش شدید آب تسریع می‌شود و

سیستم ریشه زیرزمینی ممکن است محدود و از استخراج بیشتر آب ذخیره شده در خاک جلوگیری کرده و در نتیجه، جذب آب آن محدود گردد (Iqbal et al., 2014). در یک بررسی گزارش شد که بهترین شبیه‌سازی در تیمارهایی بود که کم‌ترین تنش در آن اتفاق افتاده است. بنابراین، هرچه تنش افزایش یابد، مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدات اختلاف بیشتری پیدا خواهند کرد (Azizi Mobaser et al., 2022). به نظر می‌رسد که در روش‌های آبیاری کامل، هرگونه کمبود آب ناشی از بارش جبران می‌شود، که این مدل را قادر می‌سازد تا نتایج را با اطمینان معقول اندازه‌گیری کند. بنابراین، این مدل در روش‌های آبیاری کامل عملکرد نسبتاً خوبی دارد (Shirazi et al., 2021). عابدین¬پور (Abedinpour, 2020) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد سویا و بهره‌وری آب در سطوح مختلف آبیاری و تاریخ کاشت در شمال شرق ایران مورد ارزیابی قرار داد و بیان کرد که نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای بهره‌وری آب تحت تیمار آبیاری کامل بهتر از تیمارهای کم آبیاری در تمام تاریخ‌های کاشت بود.

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی و ماده خشک ذرت تحت دو روش آبیاری فتیله‌ای و سطحی و نرخ‌های مختلف کود نیتروژن کالیبره و اعتبارسنجی شد. به‌طور کلی، این مدل، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی ماده خشک محصول تحت سطوح مختلف آبیاری و کود نیتروژن نشان داد (RRMSE: 1.07-2.9). علاوه‌براین، دقت شبیه‌سازی تیمار سطحی۱۰۰-کود۵۰ (سال اول) و سطحی۵۰-کود۵۰ (سال دوم) برای پوشش گیاهی بهتر از سایر تیمارها بود. امّا با مقایسه تیمارهای مختلف آبیاری، دقت شبیه‌سازی در آبیاری فتیله‌ای نسبت به سایر تیمارها پایین‌تر بود. همچنین، دقت این مدل در شبیه‌سازی، ابتدا در بهره‌وری آب و سپس، عملکرد دانه بهتر از ماده خشک کل بود که می‌تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیری باشد. شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک و بهره‌وری آب در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در تمامی تیمارها کمتر از مقدار واقعی بود.



شکل ۵- رابطه بین ماده خشک کل (A)، عملکرد دانه (B) و بهره‌وری آب (C) واقعی و شبیه‌سازی شده به‌منظور صحت‌سنجی AquaCrop (سال ۱۴۰۰)

Fig. 5- Relationship between observed and simulated total biomass (A), seed yield (B) and water productivity (C) for AquaCrop validation model (2021 year)

جدول ٤- عملکرد دانه، ماده خشک و بهره‌وری آب واقعی و شبیه‌سازی شده توسط AquaCrop تحت تیمارهای آبیاری و کود در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 4- Observed and simulated yield, biomass and water productivity by AquaCrop under irrigation and fertilizer treatments in 2020 and 2021

سال Year	تیمار Treatment	عملکرد دانه Yield (t.ha^{-1})		ماده خشک Biomass (ton.ha^{-1})		بهره‌وری آب water productivity (kg.m^{-3})	
		واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated	واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated	واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated
2020	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	13.42	12.78	28.05	27.64	3.57	3.40
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	10.89	9.98	19.71	18.57	2.90	2.66
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{100}$	11.12	10.78	24.83	23.84	1.60	1.55
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{50}$	10.22	9.84	25.36	24.66	1.47	1.42
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{100}$	8.60	8.22	23.20	22.78	1.77	1.70
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{50}$	7.68	7.24	18.52	17.85	1.58	1.49
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{100}$	8.37	8.07	19.88	19.23	2.41	2.32
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{50}$	6.98	6.43	21.50	18.43	2.01	1.85
2021	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	15.02	14.41	36.53	34.05	3.38	3.24
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	14.33	12.87	34.17	33.11	3.22	2.89
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{100}$	14.78	14.35	34.17	34.00	2.05	1.99
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{50}$	13.75	13.36	35.33	34.46	1.90	1.85
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{100}$	13.50	12.78	30.33	28.83	2.67	2.53
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{50}$	8.50	7.82	33.67	31.26	1.68	1.55
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{100}$	11.48	10.79	32.50	31.08	3.18	2.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{50}$	8.99	7.85	23.33	21.62	2.49	2.17

بیشترین اختلاف مقادیر واقعی و شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب در تیمارهای فتیله‌ای (سال اول و دوم) مشاهده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که AquaCrop به‌خوبی و در حد انتظارات برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و توانایی AquaCrop در زمینه ارائه یک مدل کم‌آبیاری مانند روش فتیله‌ای مناسب و کاربردی است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود که واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop و تهیه فایل‌های گیاهی برای مقایسه آبیاری فتیله‌ای با سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نیز استفاده شود.

References

1. Abedinpour, M. (2016). Testing of AquaCrop model for maize under different water and nitrogen managements. *Journal of Agroecology and Natural Resource Management, 3*(1), 6-9.
2. Abedinpour, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model in soybean cultivation under different planting dates and deficit irrigation treatments. *Iran Agricultural Research, 39*(2), 37-46. https://doi.org/10.22099/IAR.2020.36152.1391
3. Abedinpour, M. (2021). The comparison of DSSAT-CERES and AquaCrop models for wheat under water–nitrogen interactions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52*(17), 2002-2017. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1908323
4. Adeboye, O.B., Schultz, B., Adeboye, A.P., Adekalu, K.O., & Osunbitan, J.A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture, 8*(3), 419–436. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002
5. Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by aqua crop. *International Journal of Biosciences, 4*(4), 1-9. https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.1-9
6. Amiri, E. (2016). Calibration and testing of the Aquacrop model for rice under water and nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *47*(3), 387-403. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719
7. Azizi Mobaser, J.A., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the efficiency of AquaCrop model for corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency, 2*(1), 67-84. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7483.1014
8. Cui, Z., Effah, Z., Yan, B., Gao, Y., Wu, B., Wang, Y., Xu, P., Wang, H., Zhao, B., & Wang, Y. (2023). Water and nitrogen coupling increased the water-nitrogen use efficiency of oilseed flax. *Plants*, *12*, 51. https://doi.org/10.3390/plants12010051
9. Dercas, N., Dalezios, N.R., Stamatiadis, S., Evangelou, E., Glampedakis, A., Mantonanakis, G., & Tserlikakis, N. (2022). AquaCrop simulation of winter wheat under different N management practices. *Hydrology*, *9*(4), 1-20. https://doi.org/10.3390/hydrology9040056
10. Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M.U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T.C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO’s crop water productivity model. *Agricultural Water Management, 181*, 18-22. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015
11. Greaves, G.E., & Wang, Y.M., (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water, 8*(12), 1-18. https://doi.org/10.3390/w8120557
12. Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal, 101*(3), 488-498. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs
13. Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management, 135*, 61-72. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.012
14. López-Urrea, R., Domínguez, A., Pardo, J.J., Montoya, F., García-Vila, M., & Martínez-Romero, A. (2020). Parameterization and comparison of the Aquacrop and Mopeco models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. *Agricultural Water Management, 230*, 1-14.
15. Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M.R., & Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management, 208*, 7–18. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.003
16. Pawar, G.S., Kale, M.U., & Lokhande, J.N. (2017). Response of AquaCrop model to different irrigation schedules for irrigated cabbage. *Agricultural Research, 6*(1), 73–81. https://doi.org/10.1007/s40003-016-0238-2
17. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield

response to water: ii. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438-447. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s

18. Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2021). Simulating crop response to nitrogen-deficiency stress using the critical nitrogen concentration concept and the AquaCrop. *Scientia Horticulturae*, *285*(110194), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110194
19. Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of aqua crop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, *(JBES) 4*(6), 438-449.
20. Shirazi, S.Z., Mei, X., Liu, B., & Liu, Y. (2021). Assessment of the AquaCrop model under different irrigation scenarios in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, *257*, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120
21. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm
22. Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Howell, T.A., Evett, S.R., Rojas-Lara, B.A., Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., Wani, S.P., Hoogeveen, J., & Geerts, S. (2009). Concepts and applications of crop: The Fao crop water productivity model. Crop Modeling and Decision Support, Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 175–191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_19
23. Umesh, B., Reddy, K.S., Polisgowdar, B.S., Maruthi, V., Satishkumar, U., Ayyanagoudar, M.S., Rao, S., & Veeresh, H. (2022). Assessment of climate change impact on maize (*Zea mays* L.) through aqua crop model in semi-arid alfisol of southern Telangana. *Agricultural Water Management*, *274*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107950
24. Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Vila, M.G., & Moreno, P.M. (2014). Aqua Crop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, *62*, 351-360. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005
25. Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*(1), 1309–1313. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2
26. Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., & Huang, X. (2022). Improving the Aqua Crop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules. *Agricultural Water Management*, *266*, 107599. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107599
27. Zhang, C., Xie, Z., Wang, Q., Tang, M., Feng, S., & Cai, H. (2022). Aqua Crop modelling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, *266*, 107580. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107580